

河川感潮域でのガタ土堆積に関する研究

山西 博幸¹ 松岡 由泰² 高 致晟³

1. はじめに

佐賀県六角川水系牛津川は、低平地流域を流れる強混合型の感潮河川で、六角川同様、高濃度の懸濁物が河道内を行き来している¹⁾。そのため、河岸には粘着性堆積物、いわゆる、ガタ土が大量に堆積し、ヨシの繁茂とともに河道断面の狭小化や流水能低下の原因として河川管理上の課題となっている。

本研究では、六角川水系の河道管理で特に重要な感潮区間でのガタ土堆積や懸濁物輸送の調査を実施し、これらの結果から、ガタ土堆積メカニズムについての知見を得ることを目的とした。

2. 調査方法

2.1. 調査対象域

図 1 は本研究で対象とした六角川水系牛津川 0 ～ 12km 地点の概略地図である。牛津川は、佐賀県のほぼ中央に位置し、低平地である佐賀平野を

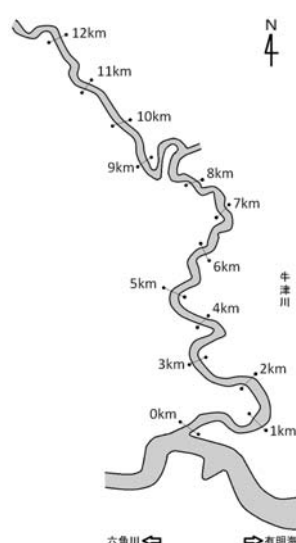


図 1 六角川水系牛津川 0 ～ 12km の概略地図

蛇行・南下しながら、河口の住ノ江で六角川と合流し有明海へと流れ込んでいる。また、有明海湾奥部は干満の差が非常に大きく、六角川水系の河口部付近で干満差が最大で 5 ～ 6 m に達すると言われている。そのため、強い潮流が発生し、常に泥の巻き上げが生じ、比較的高濁度の状態にある。この潮位変動の影響を受ける牛津川の感潮域は約 12km で、この区間において遡上する高濃度の浮遊懸濁物が低水路や河岸にガタ土として堆積している。

2.2. 広域ガタ土堆積調査

広域的なガタ土堆積の現状を把握するため、牛津川 0 ～ 10km の河岸両岸 1 km おきに標尺を設置し、これらを読み取った。なお、標尺は既往の成果²⁾をもとに、ガタ土の堆積が促進されやすい平均水位と平均満潮位の中位を目安に 2011 年 9 月に設置した。

2.3. 河道内懸濁物質の輸送に関する調査

牛津川 3.8km と 7.4km の橋上定点観測と 3 ～ 8 km 間の縦断測定を実施した。橋上からの定点観測では、水位、水温、塩分、SS、pH、クロロフィル *a* および光量子量を多項目水質計 (JFE アドバンテック (株) AAQ126) にて測定した。また、超音波ドップラー流向流速計 (SonTek 社製 River Surveyor) を用いて断面内の流速分布を求めた。船の移動観測では、多項目水質計 (JFE アドバンテック (株) AAQ126) での調査のみとした。なお、測定箇所は 3 ～ 8 km の 1 km 毎とした。

2.4. 河岸ガタ土堆積の長期変動調査

ここでは先の広域調査とは別に、局所的かつ詳細なガタ土堆積モニタリングのため、4.5km 地点の左岸部を中心に調査を実施した。ガタ土面の読み取りには広域調査同様に標尺を用い、これを 4.5

1 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター (〒840 8502 佐賀市本庄町 1)

2 国土交通省九州地方整備局関門航路事務所 (〒802 0001 北九州市小倉北区浅野 3 7 38)

3 佐賀大学大学院工学系研究科都市工学専攻 (〒840 8502 佐賀市本庄町 1)

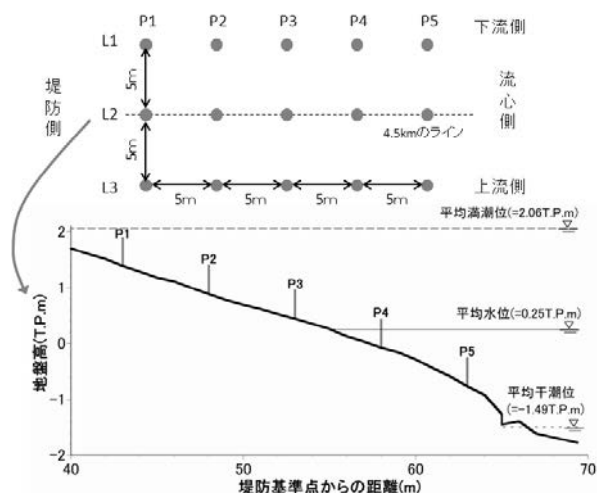


図 2 ガタ土斜面上における標尺設置位置 (4.5km左岸)

km地点の左岸水際ガタ土斜面上に設置した(図2参照)。標尺の設置場所は、4.5kmを中心に岸側から流心側に5m間隔でP1~P5測点を設け、また流れ方向±5mにも同様に測線を定め、計3測線(L1~L3)とし、標尺設置は計15地点となった。

2.5. 傾斜面上での懸濁物質の挙動に関する現地調査

ガタ土斜面上を流動する懸濁物の挙動を把握するため、ガタ土堆積の長期モニタリングを実施している地点(4.5km左岸)に、流速計(旧アレック電子社製, COMPACT-EM), クロロフィル濁度計(旧アレック電子社製, COMPACT-CLW), 水位計(旧アレック電子社製, COMPACT-TD)を設置した。流速計と濁度計の測定間隔は2分毎、水位計の測定間隔は1分毎としてデータを収集した。調査は3回行われ、調査①(2011年10月26日(大潮)~10月27日(大潮))ではP1~P3に、調査②(2012年1月9日(大潮)~1月10日(大潮))ではP3~P5に、調査③(2012年1月27日(中潮)~2012年1月28日(中潮))ではP1~2間~P4~5間にそれぞれ計器を設置した。また、底面に沈積するフラックスを算出するため、セジメントトラップを設置した。この際、セジメントトラップの開口面(6.9cm)の設置高さを変えることで、斜面上を流下する浮泥効果の有無を検討した。設置期間は2潮汐とし、セジメントトラップ内の懸濁物量を計測し、これを設置開口部の高さに応じた水没時間と開口面積(37.39cm²)で除することで沈降フラックスとした。

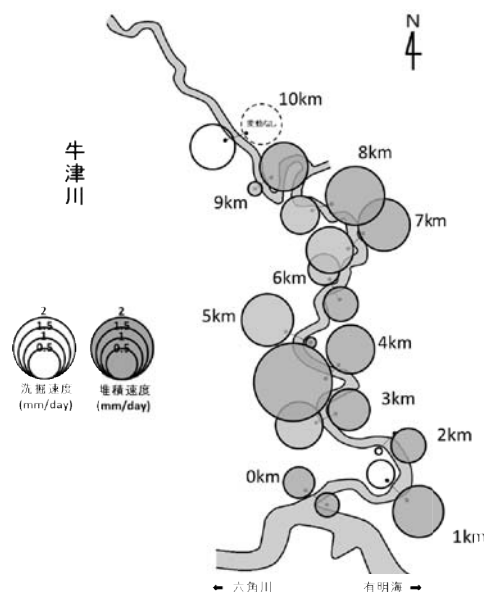


図 3 牛津川広域ガタ土堆積速度分布

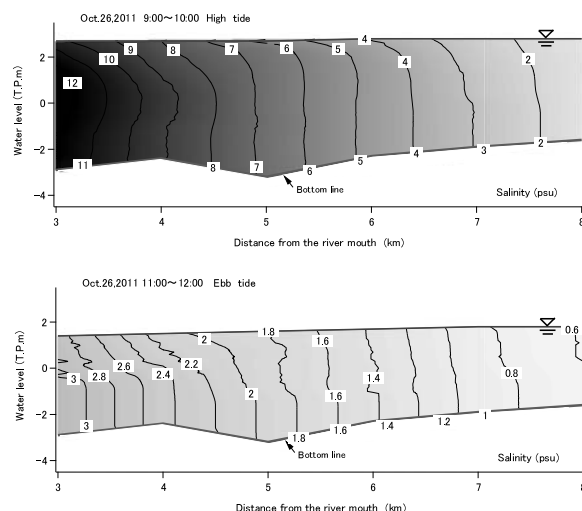


図 4 塩分の縦断分布 (2011.10.26)

3. 調査結果及び考察

3.1. 河道内広域ガタ土堆積の分布状況

図3は、2011年9月から2012年1月までの標尺値の時系列データをもとに、各地点のガタ土の堆積速度を示したものである。ほぼ測定全域にてガタ土堆積が観測され、特に4km右岸の湾曲部内側で2.8mm/dayの最大値を示した。なお、測定域全平均では0.8mm/dayの値で、顕著な堆積速度を有する場を含め、半年程度で数十cmのガタ土堆積が生じており、河川管理上、長期的かつ広域的な対策が必要である。

3.2. 牛津川河道内の懸濁物輸送の現況

(1) 移動観測による縦断方向の塩分およびSS分布特性

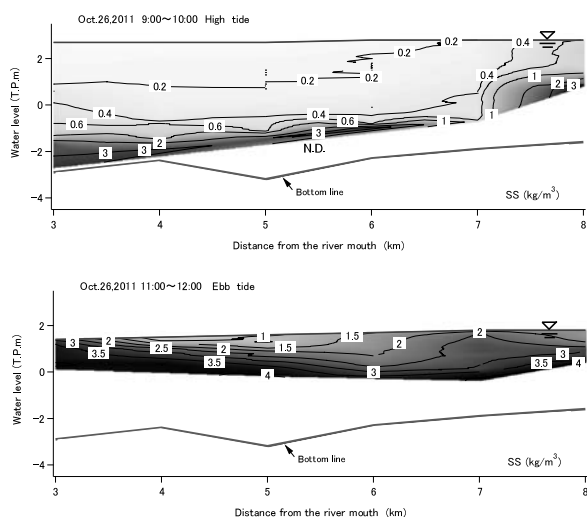


図 5 SS の縦断分布 (2011.10.26)

図 4 は、船の移動観測による塩分の縦断方向分布の一例を示したものである。測定結果は牛津川が強混合型の河川であることを示すものである。また、図 5 は、SS の縦断方向分布である。六角川で行われた既往研究¹⁾と同様、河道内に非常に高濃度の懸濁物が存在し、流れの変化とともにその様相を変化させている。残念ながら、今回の調査で用いた濁度センサーの測定限界が SS 換算で 4 kg/m^3 であり、実際の底層部はさらに高濃度の懸濁物が存在したため、データが欠測してしまった。高濃度の浮泥の流動を把握するには、高濁度の懸濁物を検出するための計測機器あるいは採水などの手法が必要ではあるが、今回の調査事実からも河道底層部には高濃度の浮泥層が形成され、河道縦断方向の流れとともに河道内を流動していると類推される。

(2) 定点観測による横断方向の水質調査結果

図 6 は、ADCP による牛津川 7.4km (砥川大橋) 断面内の流速分布を示したものである。満潮時にはやや右岸寄りで流速値低下が顕著であるものの、その後、水位の低下とともに流速が断面内で広く増加する経過が読み取れる。図の上から順に断面平均流速を算出すると、 $0.15, 0.40, 0.44 \text{ m/s}$ であった。なお、水表面の流速外挿は第 1 層目の測定値を一定とし、底層流速は $1/6$ 乗則に従う指数関数とした。先に述べた縦断方向の塩分分布から強混合型感潮河川であることを述べたが、ここでは 1 次元の移流拡散方程式から流下方向の拡散係数 K_x を見積もってみる。簡単化のため、河道断面は均一とし、塩分 S を場所 x と時間 t のみの関数とすれば、次式が得られる。

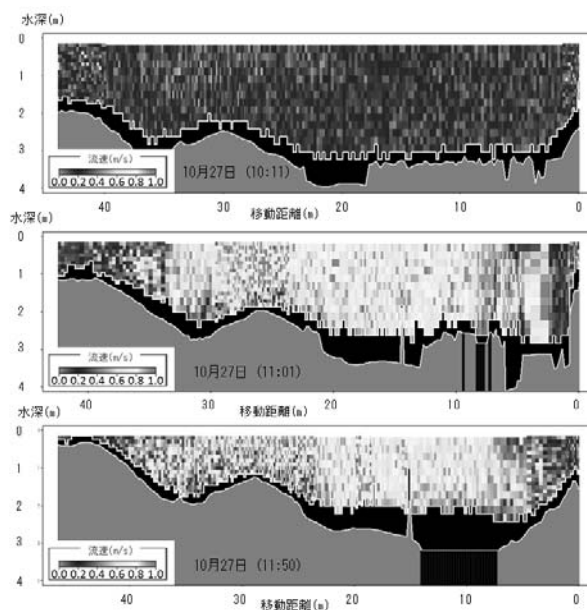


図 6 牛津川 7.4km 断面内の流速分布 (2011.10.27)

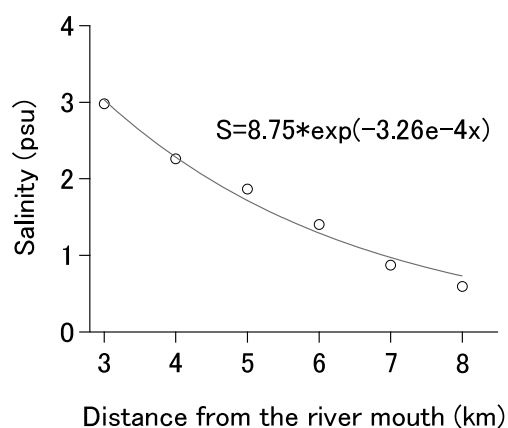


図 7 塩分と河口からの距離の関係

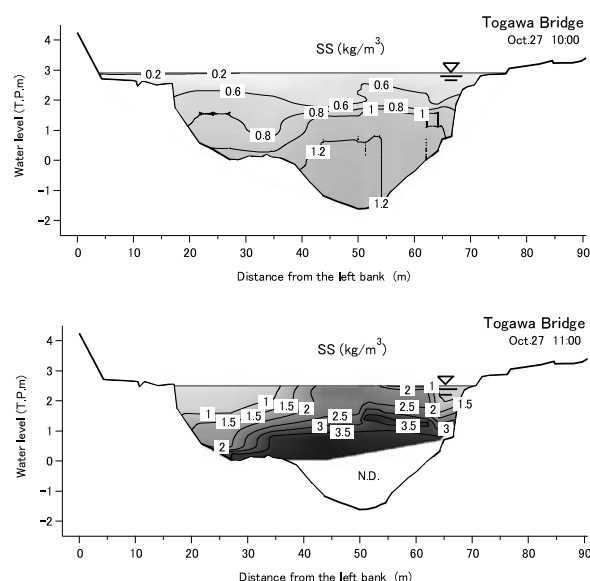


図 8 牛津川 7.4km 地点の SS 空間分布の経時変化 (2011.10.27)

$$-\frac{S}{t} = -u\frac{S}{x} + \frac{1}{x}\left(K_x\frac{S}{x}\right) \quad (1)$$

ここで、 u ：下流向きの断面平均流速，である。
いま，下げ潮期で流下方向に定常であると仮定すれば，左辺は0となり，解析解として，次式を得る。

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{uX}{K_x}\right) \quad (2)$$

図7から各地点の塩分 S を指数関数で曲線帰帰すると， $u/K_x = 3.26 \times 10^{-4}$ となり， $u = 0.44 \text{ m/s}$ を用いれば， $K_x = 1.35 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ (m^2/s)が得られる。一般に K_x は $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の例が多いが，ここで見積もった値はそれらよりも1桁オーダーが大きかった。単純化のために，均一断面としたことや断面流速の与え方にも問題もあり，さらなる調査データの収集と解析手法の検討が必要である。

図8は牛津川7.4km（砥川大橋）地点断面内のSS分布の経時変化を示したものである。図より，満潮時（10：00）には右岸底層部で 1 kg/m^3 程度のやや高濃度のSSが観測されたが，断面内のSSはさほど高くなかった。その後，時間とともに底層部でしか見られなかった高濃度（ 1 kg/m^3 ）のSSが断面内に拡がり，11：00には断面内下層部でSS検出限界（ 4 kg/m^3 ）を超えた。縦断方向のSS空間分布結果ともあわせ，底層部で高濃度の浮泥層が形成されていることを示している。

3.3 傾斜ガタ土面の堆積特性と斜面上における懸濁物輸送

図9は，測線L2におけるP1～P5のガタ土面の高さ変化を示したものである。ガタ土基準面は2010年8月20日とした。降雨等の影響で不規則な挙動を示す期間もあるが，基本的には年平均水位より地盤高の高い位置では堆積傾向，低い位置では平衡あるいは減少傾向であることがわかる。調査結果から，非洪水期における堆積速度は，平均水位より標高が高いP1～P3平均で 1.13 mm/day ，平均水位より標高が低いP4～P5平均で 0.06 (mm/day) であった。先に述べた広域調査の全平均値が 0.8 mm/day であったことから，対象域の河道内ではほぼ 1 mm/day 程の堆積速度でガタ土が堆積していると言える。

図10は調査①における水位，SSの時系列変化である。図より，上げ潮時に高濃度のSSが水際に輸送され，流速減衰期に急激なSS低下が生

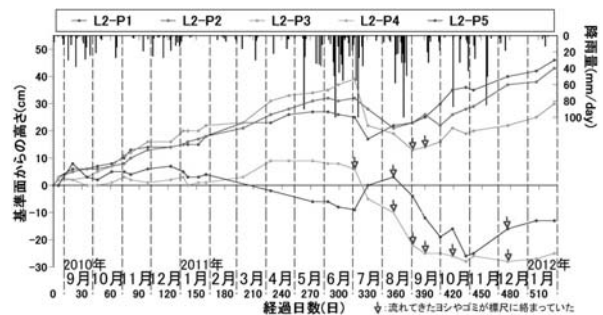


図9 L2測線でのガタ土堆積変化（2010.9～2012.1）

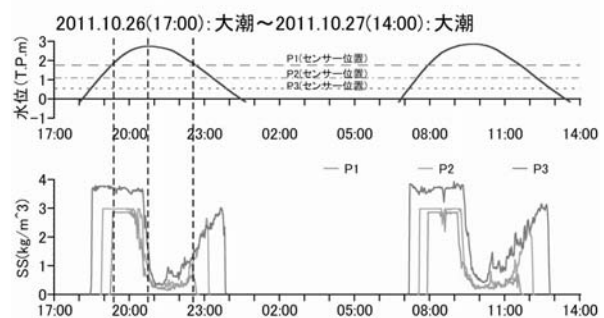


図10 水位，SSの経時変化（調査①）

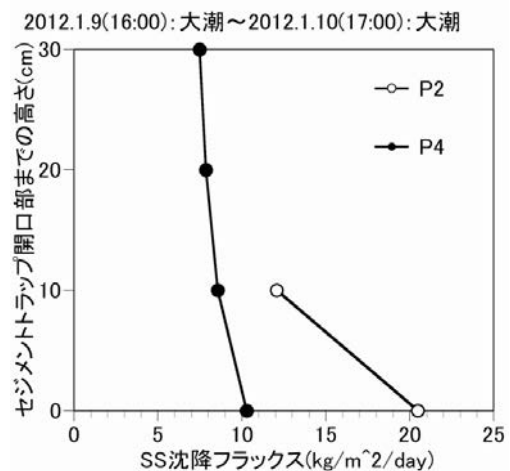


図11 セジメントトラップ開口部設置高の違いによる沈降フラックスの比較（調査②）

じ，傾斜底面上でのSSの沈降が促進すると考えられる。なお，調査①では流速計データが欠測したものの，調査②，③から急激なSS沈降が生じる限界流速がおおよそ $0.13 \sim 0.15 \text{ m/s}$ であることを確認している。その後，下げ潮に転じて，上げ潮と同等のSSは観測されなかった。これは地盤高の高い地点に輸送されてきた高濃度のSSが，緩やかな流れ場の中で底面方向へ移行したためである。逆に，傾斜面直上に形成された高濃度の浮泥が流入し，流速増加とともに拡散するため，地盤高の低い地点ではSSが高くなり，傾斜底面へ

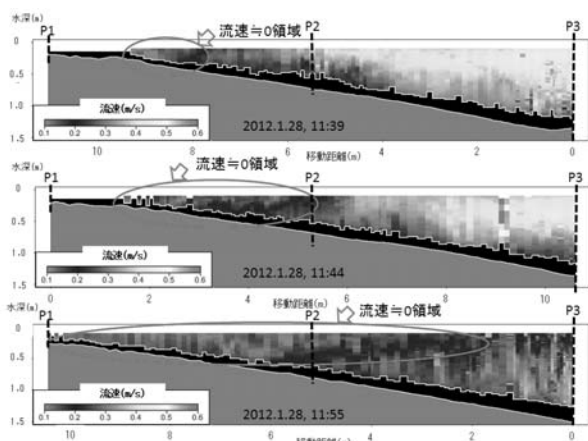


図 12 ガタ土斜面上での流速分布（調査③）

の沈積・滞留が抑制されたと考えられる。

図 11は、傾斜面上に設置したセジメントトラップ調査のうち、調査②での結果を示したものである。図より平均水位よりも地盤高の高いP2地点での底面への沈降フラックスが $20.5 \text{ kg/m}^2/\text{day}$ で、底面より10cm高い場合（ $12.1 \text{ kg/m}^2/\text{day}$ ）のおよそ2倍となった。セジメントトラップの開口面の高さによって沈降フラックスに差が生じたことから、傾斜底面部に形成された高濃度の浮泥層の存在とその流入の影響を示唆するものといえる。一方、平均水位よりも地盤高の低いP4地点では、設置高さによる大きな変化は見られず、底層部での高濃度浮泥層が存在せず、その寄与も小さいと言える。

図 12は調査③の満潮前のガタ土傾斜部における流速の空間分布を示したものである。横軸の移動距離は、ADCPを移動させた基点からの距離を示している。なお、いずれの図も右端がP3地点である。図より、満潮に向かい左岸水際表層部から流速0近くの領域が流心側へ広がっていく様子が計測されている。流速測定時と同時にP1 P2地点に設置したSSの経時変化から、この流速減衰時にSSが 2 kg/m^3 から 1 kg/m^3 まで急激に減少することが濁度センサー及び採水器によるSS測定から確認されている。つまり、流速減衰期のSS沈降が水際でのガタ土堆積を促進させる主因といえる。

3.4. 傾斜面上での懸濁物輸送と浮泥流動に関する数値計算例

ここでは、水際での水の憩流時に水中を沈降する懸濁物の挙動を固液分散流としてモデル化し、その様子について把握することとした。なお、厳密なモデル化と数値計算は避け、あくまでも斜面

上での懸濁粒子の挙動の把握を目的とした。そこで、静水中に水表面から粒子を流入させ、斜面上を流下する簡単なモデル計算としている。

数値計算には、有限要素法を用いたCOMSOL社開発のCOMSOL Multiphysics ver4.2aを用いた。また、混相流モデリングにあたり、つぎのような仮定がなされる。

①分散相（懸濁物質）と連続相（水）の密度は一定である。

②両相の挙動は同一圧力下にて計算される。

③2相間の相対速度は圧力、重力及び粘性抵抗の間の釣り合いを仮定し、決定される。

基礎式として、質量保存式と運動量保存式を用いる。それぞれ、以下の通りになる。

1) 混合物の連続式

$$\frac{\rho}{t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\rho = \phi_c \rho_c + \phi_d \rho_d$ 、 ρ_c と ρ_d は連続相と分散相の密度、 ϕ_c と ϕ_d は連続相と分散相の体積分率で $\phi_c = 1 - \phi_d$ 、 \mathbf{u} は混合相の流速で次式によって定義される。

$$\mathbf{u} = \frac{\phi_c \rho_c \mathbf{u}_c + \phi_d \rho_d \mathbf{u}_d}{\rho} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{u}_c 、 \mathbf{u}_d はそれぞれ、連続相、分散相の速度である。また、この2相間の関係は次のようになる。

$$\mathbf{u}_d - \mathbf{u}_c = \mathbf{u}_{cd} \quad (5)$$

さらに、分散相の質量分率を c_d とすると、

$$c_d = \frac{\phi_d \rho_d}{\rho} \quad (6)$$

となる。

2) 分散相の体積分率 ϕ_d の輸送方程式

$$\frac{(\phi_d \rho_d)}{t} + \nabla \cdot (\phi_d \rho_d \mathbf{u}_d) = -m_{dc} \quad (7)$$

ここで、 m_{dc} は分散相から連続相への質量輸送速度（ $\text{kg/m}^3/\text{s}$ ）である。このとき、両相の密度 ρ_c 、 ρ_d が一定ならば、式(3)と式(7)より混合物の連続式として次式が得られる。

$$(\rho_c - \rho_d) \left[\nabla \cdot (\phi_c (1 - c_d) \mathbf{u}_{cd}) + \frac{m_{dc}}{\rho_d} \right] + \rho_c (\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

3) 混合物の運動量方程式

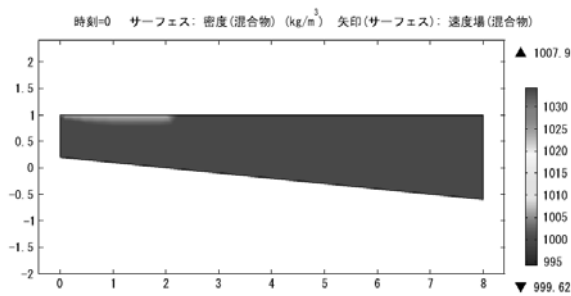


図 13(1) 混合物密度 ρ と速度ベクトルの計算結果
($t = 0 \text{ sec}$)

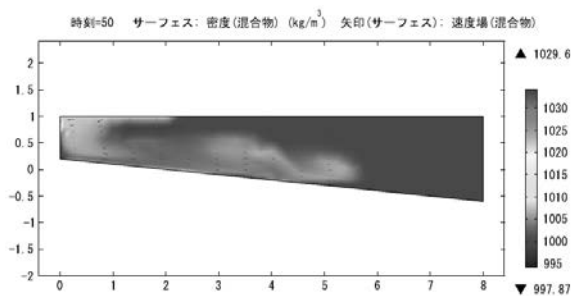


図 13(2) 混合物密度 ρ と速度ベクトルの計算結果
($t = 50 \text{ sec}$)

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p - \nabla \cdot (\rho c_d (1 - c_d) \mathbf{u}_{cd} \mathbf{u}_{cd}) + \tau_m + \rho \mathbf{g} \quad (9)$$

ここで、 τ_m は粘性力 (kg/m/s^2)、 \mathbf{g} は重力加速度 (m/s^2) である。なお、右辺の第 2 項は分散相と連続相の界面における付加的な運動量移動である。

以上の基礎式を用いて、傾斜面上での懸濁物の輸送現象について数値計算を試みた。なお、試行的な計算という立場から、底面勾配 1/10 の斜面を有する 2 次元の水槽に水と微粒子の混合物（密度 $\rho_d = 2,650 \text{ kg/m}^3$ 、粒径 $D = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、 $SS = 13.3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\phi_d = 0.005$ ）を水際端から 2 m 幅の水表面より投入し、その混合物の拡散、沈降、流動の様子とともに流速や密度の変化を計算した。

図 13(1)~(2)は $t = 0 \text{ sec}$ と $t = 50 \text{ sec}$ での混合物密度 ρ と速度ベクトルを表記したものである。高濃度の SS が静水中に投入された後、底面に到達した粒子群が斜面上を流下していく様子が再現されている。計算結果から斜面底層部には $0.15 \sim 0.2 \text{ m/s}$ の先端速度を有する浮泥流が形成され、最大密度が $1,006 \text{ kg/m}^3$ であった。これを SS 濃度に換算すると、 9.64 kg/m^3 で高濃度の浮泥形成となっている。なお、底層部の流速分布に応じて底面上でガタ土の巻き上げや底面への懸濁物の沈積

が生じると思われるが、ここでは一切考慮しておらず（底面で $m_{dc} = 0$ ）、現場との厳密な比較は難しい。しかしながら、少なくとも憩流時に水中から沈降した SS が高濃度の水塊として底面近傍に形成されて流動する様子は再現できている。今後はより実現象の場に沿ったモデル化と条件設定によって計算を進める予定である。

4. まとめ

本研究では、河岸部でのガタ土堆積にとって上げ潮流速減衰期と底層部での浮泥流動が重要であることを示した。すなわち、傾斜面上に形成された高濃度の浮泥層が転流前後の遅い流れ場の中で、平均水位よりも地盤高の高い領域で浮泥の一部が水際の流れに追従できずに沈積することを明らかにした。

今後は、これらの調査結果に基づくガタ土堆積のモデル化とともに、長期的及び広域的な視点に立った河川整備につなげていきたい。なお、有明海に河口を持つ河川には、六角川水系同様にガタ土堆積による河道管理上の課題を抱える河川が多数存在するため、本研究における成果は六角川水系のみならず、広く他河川においても有用な情報を提供し、かつ活用が可能な知見と考えられる。

謝辞：本研究は、平成23年度国土交通省河川砂防技術開発制度（地域課題分野）および平成23年度河川整備基金の助成のもとで実施されたものである。また現地調査の計画実施に対し、武雄河川事務所調査課および津出張所を中心とした関係者にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 二渡了, 楠田哲也: 強混合河川感潮部における懸濁物質輸送過程のシミュレーション, 土木学会論文集, No. 452/II 20, pp. 61-70, 1992.
- 2) 山西博幸, 白濱祐樹, 山下拓, 北岡嵩規, 濱邊竜一, 高瀬智, 山崎勉: 強混合型河川感潮域での河岸ガタ土堆積と水際植生管理に関する研究, 河川技術論文集, 第17巻 pp. 203-208, 2011.